



## 저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사학위논문

무릎 관절 부하를 고려한  
하이힐 설계 기법 제안

**Proposal of High Heel Design**

**Considering Loads on Knee Joint**

2017년 8월

서울대학교 대학원

기계항공공학부

서 정 미

# 무릎 관절 부하를 고려한 하이힐 설계 기법 제안

## Proposal of High Heel Design Considering Loads on Knee Joint

지도교수 이 건 우

이 논문을 석사 학위논문으로 제출함

2017년 8월

서울대학교 대학원  
기계항공공학부  
서 정 미

서정미의 석사 학위논문을 인준함

2017년 8월

위 원 장 \_\_\_\_\_ 안 성 훈 (인)

부위원장 \_\_\_\_\_ 이 건 우 (인)

위 원 \_\_\_\_\_ 박 용 래 (인)

## 초 록

현대 여성의 의복에서 하이힐은 빼놓을 수 없는 요소임에도 불구하고, 생체역학적 관점에서 하이힐 착용은 근육과 관절 등 인체에 많은 악영향을 야기한다. 따라서 하이힐 보행을 일반 보행과 비교 분석하고 하이힐 착용의 최소화를 권고하는 기존의 관점에서 벗어나, 하이힐의 다양한 설계적 요소가 인체에 미치는 영향을 분석하고, 생체역학적 관점에서 부작용이 적은 인체 공학적 하이힐 개발을 시도 할 필요가 있다. 특히 남성에 비해 상대적으로 높은 여성의 무릎 관절염 발생 원인 중 하나로 하이힐이 지목되지만, 발에 생기는 압력을 줄이려는 시도가 많은 것에 비해 무릎 관절 무리를 줄이려는 시도는 아직 미흡하다. 따라서 본 연구는 인체 공학적 하이힐을 설계 하려는 첫 번째 시도으로써, 다양한 형상의 하이힐 보행 관찰을 통하여 하이힐의 높이 이외의 하이힐의 형상에 따른 보행 변화를 분석하고, 무릎 부작용을 최소화 할 수 있는 하이힐의 최적 설계 가이드를 제시 하려고 한다.

이를 위해서 다양한 종류의 하이힐에 대한 보행 모션 캡처 실험을 진행하고, 보행 분석을 진행 하였다. 이 과정을 통해, 일반 보행과 하이힐 보행에서 CoP의 이동 패턴이 다르다는 것, 그리고 하이힐 설계 변수에 따라서 CoP의 이동 패턴과 보행 시 발목 관절의 패턴이 다르다는 것을 관찰 하였다. 또한, 구체적으로 무릎에 미치는 영향을 알아보기 위하여 근골격 시뮬레이터를 통해 무릎 모멘트를 계산하고

비교하였다. 근골격 시뮬레이션에서는 실험 데이터를 사용 할 뿐 아니라 실험 내용을 고찰 한 내용을 바탕으로, 설계 요소의 조합으로 만든 가상의 하이힐에 대한 무릎 모멘트도 계산하여 비교한다. 이 과정을 통해 하이힐의 설계 변수가 무릎 모멘트에 미치는 영향의 정도를 알아보고, 인체 공학적 하이힐에 대하여 고찰 해 보았다.

**주요어 :** 하이힐설계, 인간공학, 보행분석, 요소설계, 근골격시뮬레이션

**학 번 :** 2015 - 22714

# 목 차

제 1 장 서 론 .....	1
1.1 연구의 배경 .....	1
1.2 연구의 목적 .....	2
1.3 용어의 정의 .....	3
제 2 장 실험 방법 .....	4
제 3 장 실험 결과 .....	10
제 4 장 고찰 .....	15
4.1 하이힐 설계와 보행 패턴 변화 .....	15
4.1.1 발목 관절 패턴의 변화 .....	15
4.1.2 압력 중심 패턴의 변화 .....	17
4.2 하이힐 설계 인자와 무릎 모멘트 .....	19
4.2.1 지면 반력과 무릎 모멘트 .....	19
4.2.2 하이힐 설계와의 관계 .....	21
4.2.3 근골격 시뮬레이션을 이용한 무릎 모멘트 계산 .....	21
4.3 하이힐 설계에의 응용 .....	23
4.4 한계 및 의의 .....	24
제 5 장 결론 .....	266
참고문헌 .....	28
Abstract .....	32

# 표 목차

<b>Table 1</b> 실험에 사용된 하이힐의 종류 [cm] .....	8
<b>Table 2</b> 설계 변수에 따른 모멘트 [Nm] .....	23

# 그림 목차

<b>Figure 1</b> 전족 : 사진의 진한 부분 .....	3
<b>Figure 2</b> 모션 캡처 실험 장소.....	4
<b>Figure 3</b> Plug-in-Gait 마커셋.....	6
<b>Figure 4</b> 발에 부착한 마커와 마커 이름 .....	7
<b>Figure 5</b> 실험에 사용 된 하이힐, 좌측부터 하이힐 1,2,3.....	7
<b>Figure 6</b> 보행 주기에 따른 고관절의 관절 각도.....	10
<b>Figure 7</b> 보행 주기에 따른 무릎 관절(슬관절)의 관절 각도 .....	11
<b>Figure 8</b> 보행 주기에 따른 발목 관절(족관절)의 관절 각도 .....	11
<b>Figure 9</b> 보행 주기에 따른 진행 방향의 GRF.....	12
<b>Figure 10</b> 보행 주기에 따른 좌우 방향의 GRF .....	13
<b>Figure 11</b> 보행 주기에 따른 수평 방향의 GRF.....	13
<b>Figure 12</b> 보행 주기에 따른 CoP의 이동 방향 (진행 방향).....	14
<b>Figure 13</b> 맨발 보행과 하이힐 보행에서의 초기 접지기.....	15
<b>Figure 14</b> 실험에 사용된 하이힐의 초기 접지 지점 위치.....	16
<b>Figure 15</b> 10cm 높이 하이힐에서의 보행 주기에 따른 발목 관절 각도...17	17
<b>Figure 16</b> 발을 땅에 디딜 때, 전족부와 후족부로 나누어지는 압력.....	18
<b>Figure 17</b> GRF와 각 관절에서의 거리.....	19
<b>Figure 18</b> 하이힐 보행에서 GRF의 크기가 최대가 되는 구간.....	20
<b>Figure 19</b> 무릎 관절 모멘트의 최대값.....	22
<b>Figure 20</b> 비슷한 디자인의 초기 접지 지점이 다른 웨지 하이힐.....	24

# 제 1 장 서론

## 1.1 연구의 배경

하이힐은 현대 의복에 있어 빠질 수 없는 요소이다. 우리나라 최대 제화 회사인 금강제화의 2013년~2015년 하이힐 매출은 여성화 매출의 절반이 넘었으며 2013년에는 83%에 달하였고<sup>[1]</sup>, 미국의 여성들의 절반 이상은 일상 생활에서 하이힐을 착용 한다고 한다<sup>[2]</sup>. 심지어 최근에는 굽 높이가 높은 남성화 시장도 꾸준히 커지는 추세이다<sup>[3]</sup>.

이러한 하이힐의 수요에도 불구하고, 하이힐은 여러 방면으로 인체에 악영향을 미친다. 먼저 하이힐을 착용 하게 되면 입위(Standing Position) 및 보행에 있어 균형을 유지 하는 것이 어렵게 되고<sup>[4-6]</sup>, 보행 패턴이 변하게 된다. 입각기에서 무릎의 굴곡(Flexion)각도가 커지고, 하이힐 보행 전반에서 일반 보행보다 족저굴 하는 경향이 있다<sup>[7-11]</sup>. 또한 활보장이 짧아지고, 양 발 지지구간이 늘어나는 특성도 보인다<sup>[12]</sup>.

보행 특성이 달라짐에 따라, 인체의 각 관절 및 근육에 영향을 미치게 된다. 하이힐 착용은 몸통의 각도를 바꿈에 따라 허리 근육을 피로하게 만들며, 요통을 유발 할 수 있다<sup>[13,14]</sup>. 또한, 대퇴직근, 장딴지근, 앞정강이근 등 발목 주변과 하지 전반의 근육 활성화에 영향을 미쳐, 근육을 더 쉽게 피로하게 만든다<sup>[15-18]</sup>. 전족부에 압력을 가하게 하여 무지 외반증의 원인이 되기도 한다<sup>[19-21]</sup>.

특히 하이힐이 무릎에 미치는 영향은 매우 크다. 하이힐 착용은



무릎에 상대적으로 큰 모멘트를 발생 시키며<sup>[22-25]</sup>, 남성에 비해 여성의 무릎 골관절염(Osteoarthritis) 발병 비율이 2배 가량 높은 원인 중 하나로 하이힐의 착용이 지목 되고 있다<sup>[22-24]</sup>. 하지만 여러 가지 보조 기구로 전족부에 가해지는 압력을 줄이려는 시도가 있는 것에 비해, 무릎에 가해지는 모멘트를 줄이려는 시도는 아직 미흡하다.

## 1.2 연구의 목적

대부분의 생체 역학 연구에서는 일반 보행과 하이힐 보행을 비교하며 하이힐의 악영향을 설명하고, 하이힐 착용을 최소화 할 것을 권고한다. 인체 공학적 의자나 운동화와 같이 현대 생활에서 필요한 부분이라면 생체역학적인 부작용을 최소화 할 수 있는 인간 공학적 제품을 설계 개발 하려는 노력을 한다. 하이힐도 같은 관점에서 보다 인체에 덜 나쁜 하이힐을 개발하기 위한 노력이 필요하다.

이와 같은 배경에서, 기존의 일반 보행과 하이힐을 비교하는 시도에서 벗어나 다양한 하이힐 간의 보행 특성을 비교해 보려고 한다. 또한 비교 분석 된 특성을 바탕으로 무릎에 보다 덜 악영향을 미치는 하이힐을 설계 할 수 있는 가이드를 제시해 보려고 한다.

### 1.3 용어의 정의

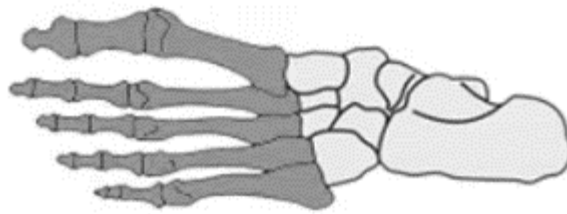
편의를 위하여, 앞으로 쓰일 용어를 본 절에서 정의 하려고 한다.

#### 앞/뒤

보행 진행 방향을 기준으로 앞/뒤를 말한다. 다시 말해서 시상면(Sagittal plane)에서의 복측(Ventral)이 앞이 되며, 배측(Dorsal)은 뒤가 된다.

#### 전족 (Forefoot)

발을 세 부분으로 나누었을 때, 중족골과 족지골로 구성된 부분을 의미한다.



**Figure 1** 전족 : 사진의 진한 부분<sup>①</sup>

#### GRF

Ground Reaction Force의 약자로, 지면 반력을 의미한다. 보행 동작의 근골격 시뮬레이션에 있어, 외력이 된다.

#### CoP

Center of Pressure의 약자로, 압력 중심을 의미한다. GRF의 중심점으로, GRF가 인체에 작용하는 지점이 된다<sup>[26]</sup>.

---

<sup>①</sup> 사진 출처 “The Foot” <https://posemethod.com/the-foot/#!event-list> (2017.06.26 접속)

## 제 2 장 실험 방법

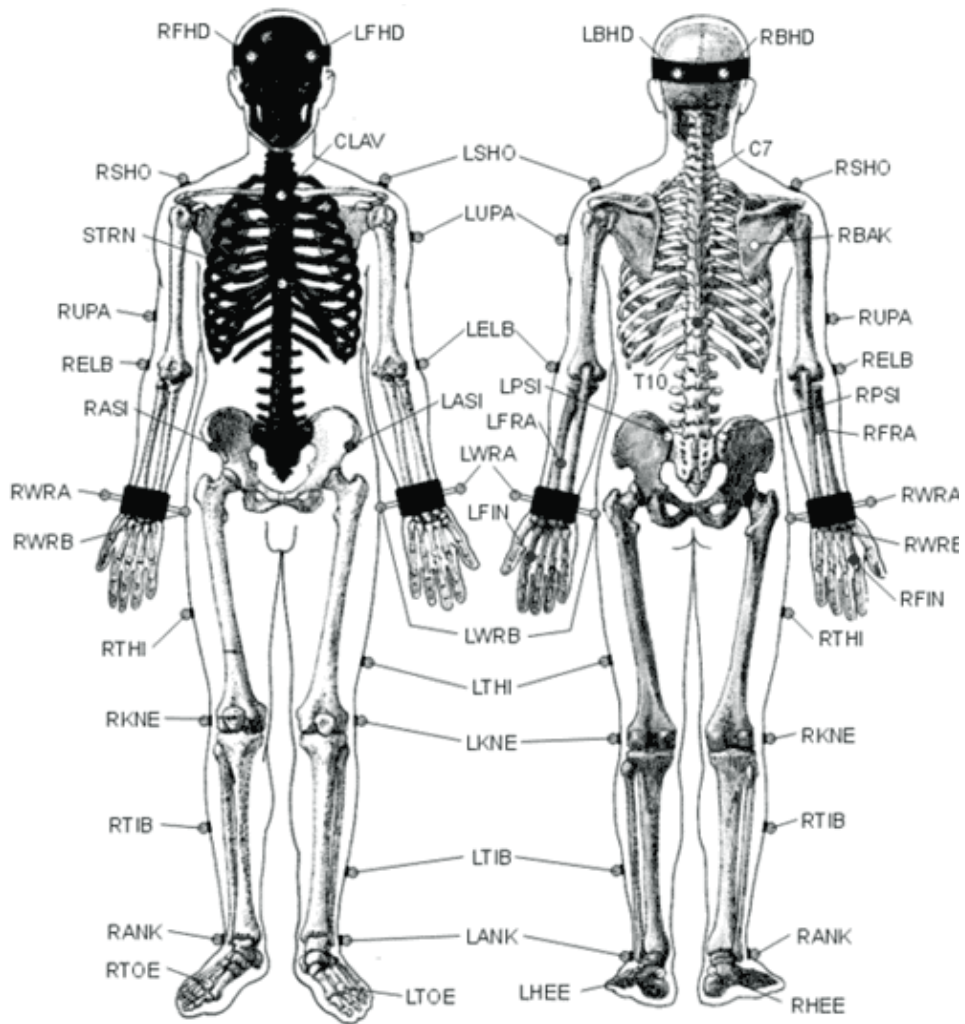
여러 가지 보행을 분석하기 위해 모션 캡처 실험을 진행하였다. 실험은 경기도 광교의 서울대학교 차세대 융합 기술 연구원 모션캡처 스튜디오에서 진행 되었으며, 광학식 마커를 이용한 모션캡처 데이터와 지면 반력 데이터가 수집되었다. 이를 위한 장비로는 모션캡처를 위한 광학식 카메라(VICON T160 CAMERA) 11대와 지면반력 측정을 위한 지면반력기(AMTI Force Platform) 2대가 사용 되었으며, NEXUS Software (Vicon, 1.8.5ver)를 통해 녹화 되었다<sup>[27]</sup>.



**Figure 2** 모션 캡처 실험 장소

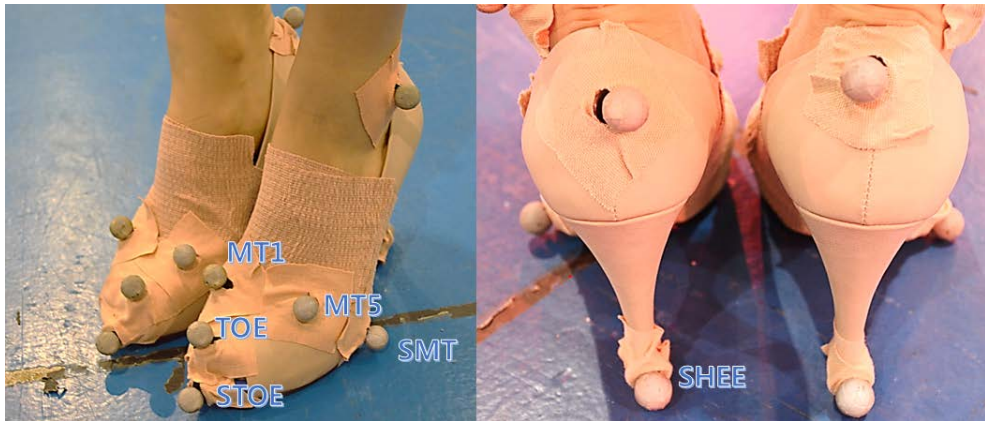
마커셋은 일반적으로 보행에 사용 되는 그림3의 Plug-in-Gait 마커셋을 기반으로, 상체(HAT, Head Arm Trunk)를 하나의 분절로 가정하는 보행 분석을 진행 할 예정이기 때문에 머리와 상완에 해당하는 마커를 제하였다. 또한, 발을 자세히 관찰 하기 위해 그림 4와 같이 5개의

마커를 추가하였다. Plug-in-Gait에서 TOE에 해당하는 마커는 MT1이라고 이름을 변경하였고, 추가 된 마커는 중족지(Metatarsophalangeal) 관절 5번(MT5), 엄지 발톱(TOE), 하이힐의 가장 앞과 뒤 (STOE, SHEE), 그리고 신발 바닥을 기준으로 가장 외측(Lateral) (SMT)이다. 또한 신발과 발을 하나의 분절로 가정하고 해석 하기 위하여, 인체에 무해한 테이프를 하이힐을 발에 고정시켰다.



**Figure 3** Plug-in-Gait 마커셋<sup>②</sup>

<sup>②</sup> 사진 출처 “Marker Placement Protocols” [http://www.lifemodeler.com/LM\\_Manual\\_2010/A\\_motion.shtml](http://www.lifemodeler.com/LM_Manual_2010/A_motion.shtml) (2017.06.26 접속)



**Figure 4** 발에 부착한 마커와 마커 이름

본 실험에는 근골격 질환이 없는 키 158cm 몸무게 46kg 의 만 23세 여성이 참여하였다.

피험자의 자유 속도로 두 개의 지면 반력기를 각각 하나씩 밟고 지나가도록 하였다. 일반 보행은 3회, 하이힐 보행은 5회 반복 수행하였다.

실험에 사용된 신발은 총 3가지 이며, 뒷굽과 앞굽의 차이는 약 8cm로 일정하고, 기타 조건은 표1과 같다.



**Figure 5** 실험에 사용 된 하이힐, 좌측부터 하이힐 1,2,3

**Table 1** 실험에 사용된 하이힐의 종류 [cm]

	하이힐 1	하이힐 2	하이힐 3
굽 종류	Wedge	French	French
뒷굽 높이	10	10	10
앞굽 높이	2	2	4

모션캡처 실험이 끝난 직후의 데이터의 마커의 위치 데이터만 존재한다. Nexus 를 통하여 각각의 마커를 정의 하는 레이블링(Labeling)작업을 진행하고 C3D라는 포맷의 모션캡처 파일을 만들었다.

이후 근골격 시뮬레이터 AnyBody(AnyBody Technology, AnyBody.6.0)에서 최적화를 통한 스케일링과 역역학 해석이 진행된다. 이 과정은 최적화는 Anybody에서 제공하는 MoCapModel 템플릿을 기반으로 하였다.

스케일링은, 마커 데이터와 실험자의 키, 몸무게 데이터를 이용하여 인체 각 분절의 길이와 질량, 관성 성질을 결정하는 과정이다. 이때, MoCapModel에서는 분절의 질량을 구하는데 있어 유럽 남성 기준<sup>[28]</sup>으로 기본 설정 되어 있기 때문에 한국 여자의 인체 계측 데이터로<sup>[29]</sup> 수정하여 진행하였다.

이후, 마커 데이터를 이용하여 각 관절의 시간에 따른 각도를 구하고, 구해진 관절 각도를 이용한 역역학 해석을 통해 무릎에 생기는 모멘트를 계산하게 된다.

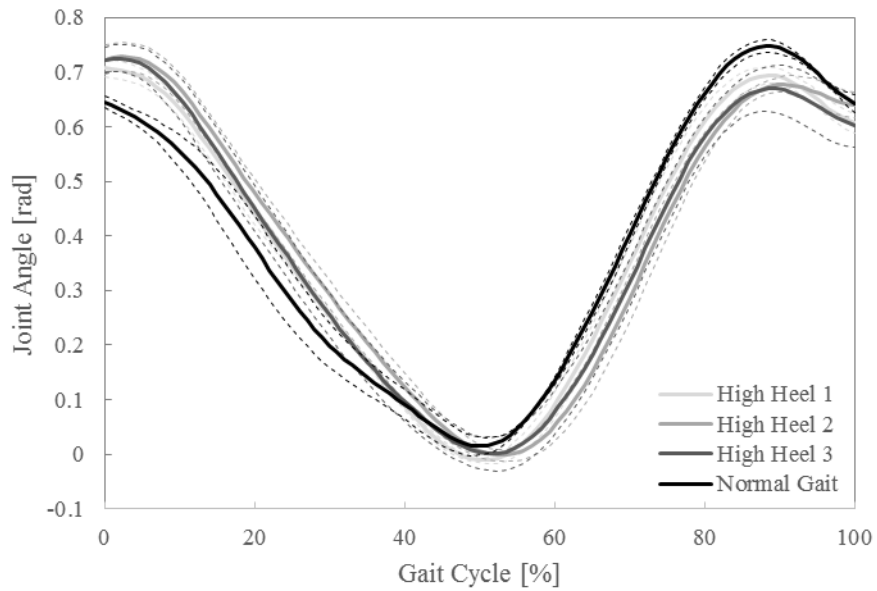
MoCapModel은 C3D 포맷의 파일을 이용한 역역학 해석만을 지원하지만, 본 연구에서는 실제 실험으로 얻어진 C3D포맷의 데이터가 아닌 임의의 관절 각도와 지면 반력 데이터의 해석이 필요하였다. 이 해석을 진행 하기 위해 C3D 포맷의 파일이 아닌 데이터를 텍스트 파일을 이용하여 AnyBody에서 읽어 들이는 작업을 진행하였다. 관절 각도의 경우, 역역학(Inverse Dynamics) 해석을 진행하기 이전에 해석의 입력값으로 사용되는 텍스트 데이터에서 관절 각도를 변경 하여 원하는 인체의 움직임을 해석 하도록 하였다. GRF와 CoP 데이터의 입력은, 기존의 C3D 파일에서 지면 반력 데이터를 읽고 계산하는 함수에서, 해석을 위해 제작한 텍스트 파일을 읽어 들이게 하였다. 지면 반력기 데이터는 세 가지 방향의 힘과 모멘트, 그리고 지면 반력기 중심의 위치를 이용하여 GRF와 CoP를 계산하는데, 원하는 CoP의 위치에 GRF와 지면 반력기의 위치를 이용하여 모멘트 성분을 계산하였다.

데이터의 노이즈 처리와 평균 계산 등은 Matlab(MathWorks,R 2016a ver)을 이용하였다.

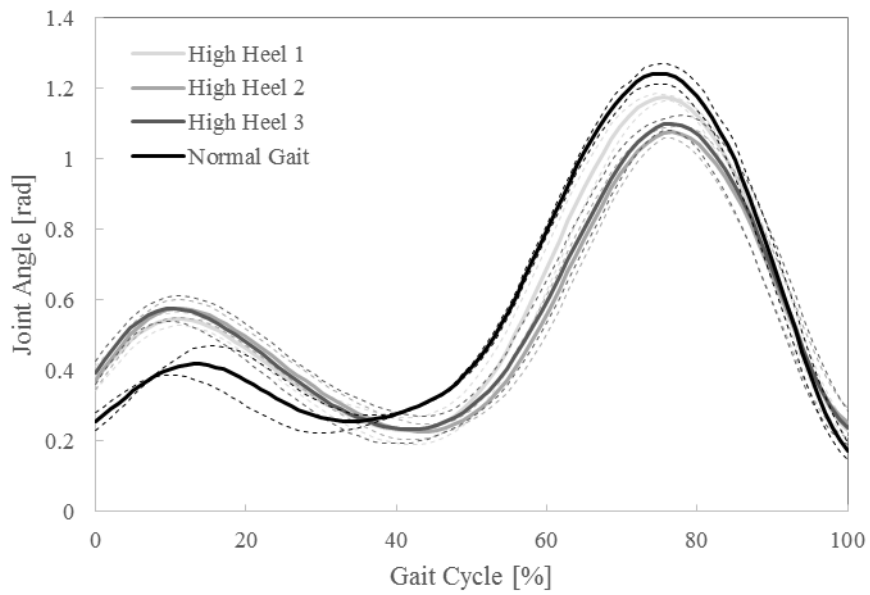


### 제 3 장 실험 결과

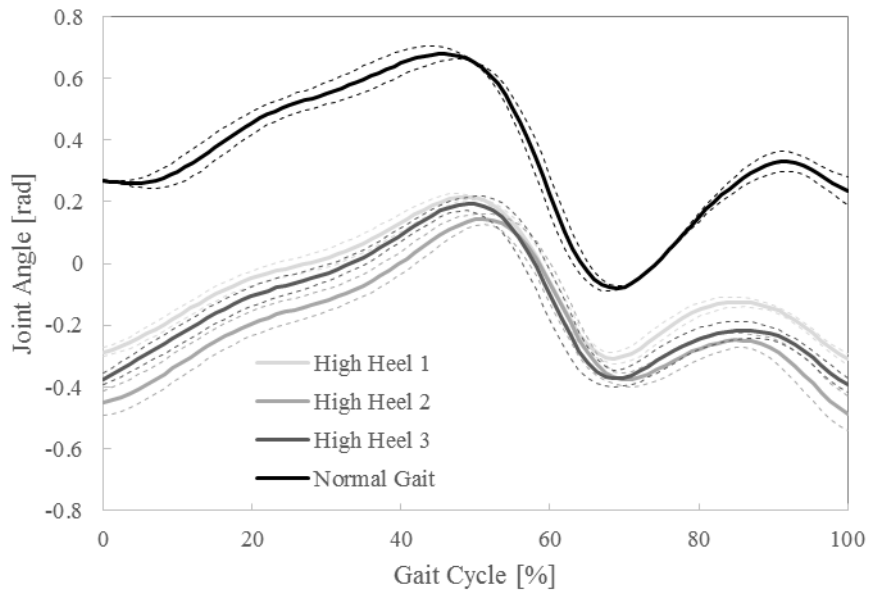
먼저, 보행주기에 따른 하지 관절 각도를 그림 6~8에 표한다.



**Figure 6** 보행 주기에 따른 고관절의 관절 각도



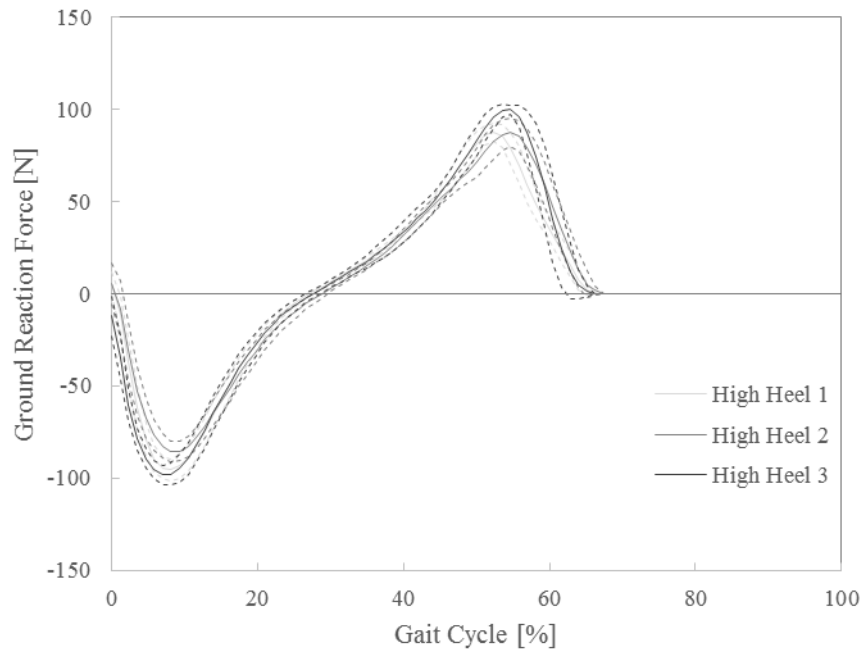
**Figure 7** 보행 주기에 따른 무릎 관절(슬관절)의 관절 각도



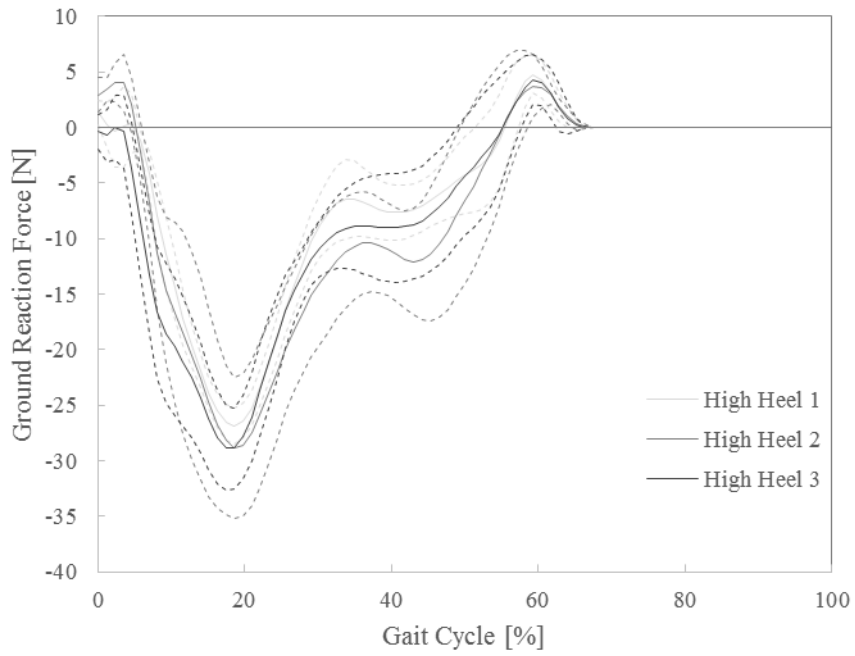
**Figure 8** 보행 주기에 따른 발목 관절(족관절)의 관절 각도

무릎의 각도의 입각기(Stance Phase)에서 최대값이 하이힐 보행이 일반 보행보다 크고, 유각기(Swing Phase)는 일반 보행보다 하이힐 보행의 최대값이 작다. 이것은 기존의 연구에서 비교 한 하이힐 보행의 특성과 일치한다<sup>[8,9,23,24]</sup>.

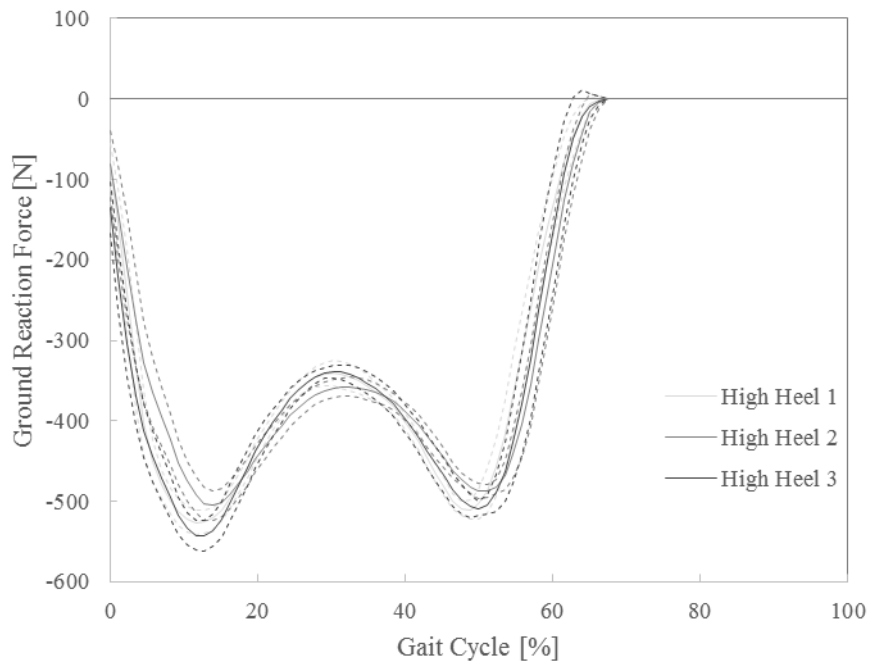
다음 그림 9~11는 GRF의 패턴이다. 하이힐간의 유의미한 차이는 보이지 않았다.



**Figure 9** 보행 주기에 따른 진행 방향의 GRF

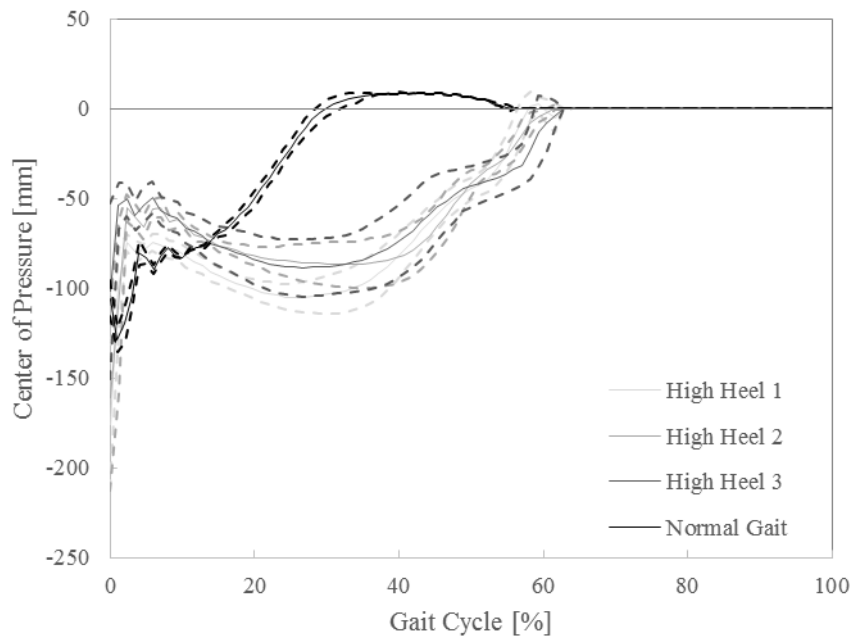


**Figure 10** 보행 주기에 따른 좌우 방향의 GRF



**Figure 11** 보행 주기에 따른 수평 방향의 GRF

그림 12는 CoP의 패턴이다. 세로축의 영점은 CoP가 끝나는 지점을 의미한다. 다시 말해서 일반 보행의 경우 뒤꿈치에서 전족으로 CoP가 이동하지만, 하이힐 보행에서 CoP는 발 중앙부에서 뒤로 갔다가 전족부로 다시 이동하는 양상을 띤다.



**Figure 12** 보행 주기에 따른 CoP의 이동 방향 (진행 방향)

## 제 4 장 고찰

### 4.1 하이힐 설계와 보행 패턴 변화

#### 4.1.1 발목 관절 패턴의 변화

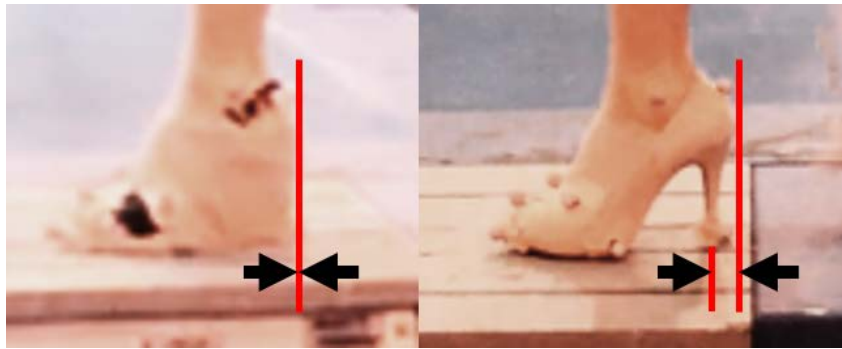
본 실험 결과는 모든 종류의 하이힐 보행에서 기존 연구들과 유사한 패턴을 보인다<sup>[8,9,23,24]</sup>. 또한 일반 보행과 하이힐 보행을 비교 해 보았을 때 하지의 움직임 중에서도 발목 관절은 변화는 두 보행이 겹치는 부분이 전혀 없을 정도로 큰 차이를 보인다. 발목 관절 변화의 차이는 일반 보행 - 하이힐 보행뿐만이 아니라, 하이힐의 종류에 따라서도 분명한 차이를 보였다. 이러한 현상은 인간이 보행을 할 때, 하이힐 형상에서 오는 차이를 발목의 제어를 통해 보간 하려는 것으로 보인다.



**Figure 13** 맨발 보행과 하이힐 보행에서의 초기 접지기<sup>③</sup>

<sup>③</sup> 사진 출처 “Wearing high heels - Scholl Biomechanics”  
<https://www.youtube.com/watch?v=xlnmvALaMZg> (2017.06.26 접속)

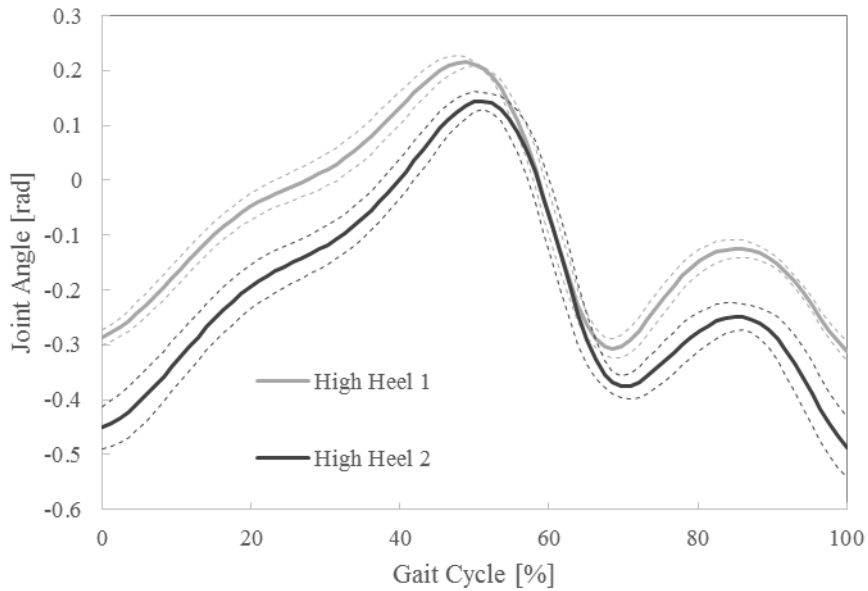
보행 주기에서 그림13과 같이 발이 처음 지면과 접촉하는 시점을 초기 접지기(Initial Contact)라고 부른다<sup>[30]</sup>. 지면과 처음 접지(Contact)하는 지점이 맨발 보행의 경우 발 뒤꿈치가 되지만, 하이힐의 경우 뒷굽의 아랫부분이 먼저 닿는다. 이렇게 지면에 처음 접하는 지점을 초기 접지 지점이라고 할 때, 하이힐의 형상에 따라 이 초기 접지 지점이 달라지게 된다. 예를 들어 그림14를 보면, 본 연구에 쓰인 10cm높이의 하이힐에서 하이힐2의 초기 접지 지점이 더 신발 안쪽으로 들어가있다.



**Figure 14** 실험에 사용된 하이힐의 초기 접지 지점 위치

(좌) 하이힐1 (우) 하이힐2

발목 이외의 관절 움직임이 하이힐의 종류에 상관 없이 일정하다고 하였을 때, 초기 접지 지점이 하이힐2와 같이 안으로 들어가게 되면, 지면과 초기 접지 지점이 접지 하게 하기 위해 발목 더욱 족저굴(Plantar Flexion)하게 된다. 따라서 그림15와 같이 하이힐2를 착용한 보행에서 하이힐 1보다 전반적으로 족저굴 하는 양상을 띠는 것이다.



**Figure 15** 10cm 높이 하이힐에서의 보행 주기에 따른 발목 관절 각도

6cm와 9cm의 하이힐 보행을 비교한 기존 연구를 보면, 보행에 있어 무릎 관절의 각도는 두 종류의 하이힐에서 일치하지만, 발목 관절 각도는 차이를 보인다<sup>[8]</sup>. 이 차이는 본 연구에서 같은 높이의 하이힐일 때 초기 지점의 각도의 차이에서 오는 변화와 유사하다. 따라서 이 현상 또한, 굽의 높낮이의 일차적 문제가 아니라 굽의 높이 변화에서 오는 초기 접지 지점과 발목의 상대적 위치 차이라고 볼 수 있는 것이다.

#### 4.1.2 압력 중심 패턴의 변화

일반 보행에서 CoP는 발 뒤꿈치에서 시작해 발가락까지 보행의 진행 방향을 향해 이동한다. 그림12를 보면 하이힐 보행에서의 CoP변화는



굽이 처음 닿는 충격 이후 발의 중앙에 위치하였다가 보행 진행 방향의 반대 방향으로 향하는 패턴을 보인다. 하이힐을 착용하면 일반 신발보다 발의 앞쪽 압력이 큰 경향이 있는데<sup>19)</sup>, 신발과 발 사이의 압력 변화가 지면과 신발 사이의 힘에도 반영되어 CoP 위치가 달라졌다고 생각 할 수 있다. 따라서 이러한 CoP의 패턴은 하이힐 보행의 특징으로 보인다. 또한 하이힐 사이에서의 패턴 변화도 관찰 할 수 있는데, 굽이 두꺼운 하이힐의 CoP 가 비교적 전족부와 먼 곳에서 머무르는 경향이 있다. 보행에서 CoP 위치는 발의 전족부와 후족부로 분산된 힘의 합력의 위치로 나타내어진다. 따라서 굽이 가늘수록 후족부에 체중을 싣는 것이 어려워지기 때문에 부하를 더 적게 분산하고, CoP의 위치가 비교적 전족부에 위치 하는 것이라고 생각 할 수 있다.



**Figure 16** 발을 땅에 디딜 때, 전족부와 후족부로 나누어지는 압력<sup>④</sup>

④ 사진 출처 “MatScan Barefoot Pressure Measurement and Gait Analysis”  
<https://www.youtube.com/watch?v=QuaEdhgLdKM> (2017.06.26 접속)

## 4.2 하이힐 설계 인자와 무릎 모멘트

### 4.2.1 지면 반력과 무릎 모멘트

무릎에 생기는 모멘트는 골관절염과 밀접한 관계가 있다<sup>[22-24]</sup>. 따라서 무릎에 모멘트가 높으면 상대적으로 골관절염의 발병 확률이 높아지며, 무릎에 악영향을 준다고 생각 할 수 있다. 무릎에 생기는 모멘트를 구하는 방법은 여러 가지가 있지만, 가장 직관적인 방법은 GRF벡터와 무릎과 GRF벡터의 직선 거리의 곱으로 구하는 근사가 있다.

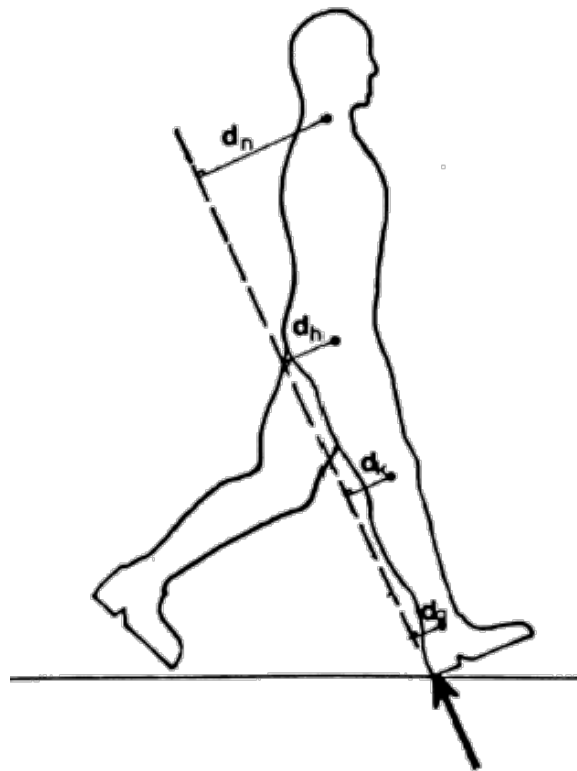
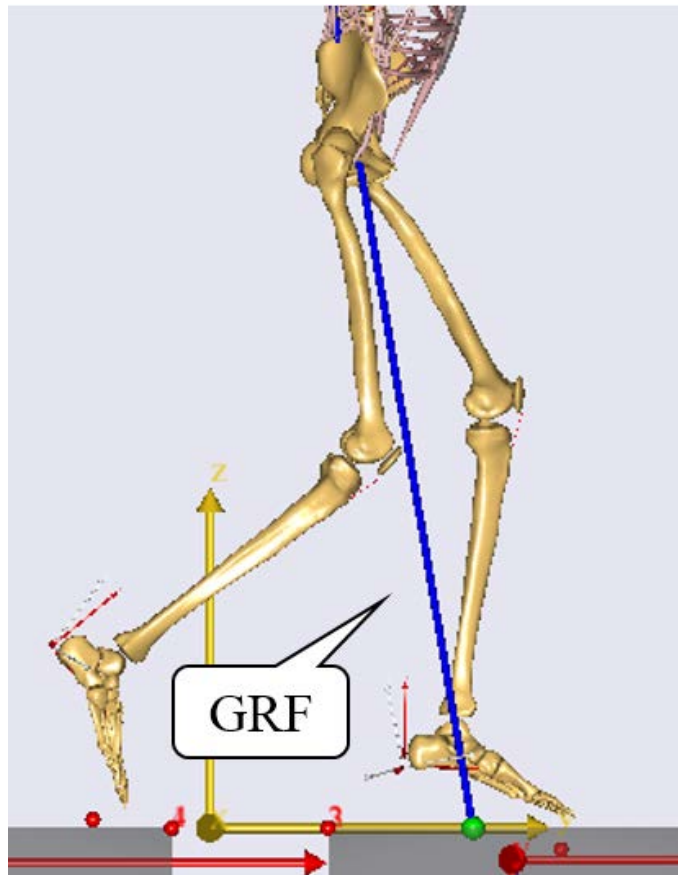


Figure 17 GRF와 각 관절에서의 거리<sup>[28]</sup>

그림18은 하이힐 보행에서 무릎의 모멘트가 최대값을 나타내는 순간인데, CoP의 위치가 전족으로 향할수록 무릎과 GRF의 거리가 가까워지고, 무릎 모멘트의 크기가 작아지는 것을 알 수 있다. 따라서 하이힐의 종류에 따른 GRF 크기의 변화가 없다는 가정에서 CoP를 가능한 앞으로 유도 하는 것이 무릎에 좋은 디자인이라고 생각 할 수 있다.



**Figure 18** 하이힐 보행에서 GRF의 크기가 최대가 되는 구간

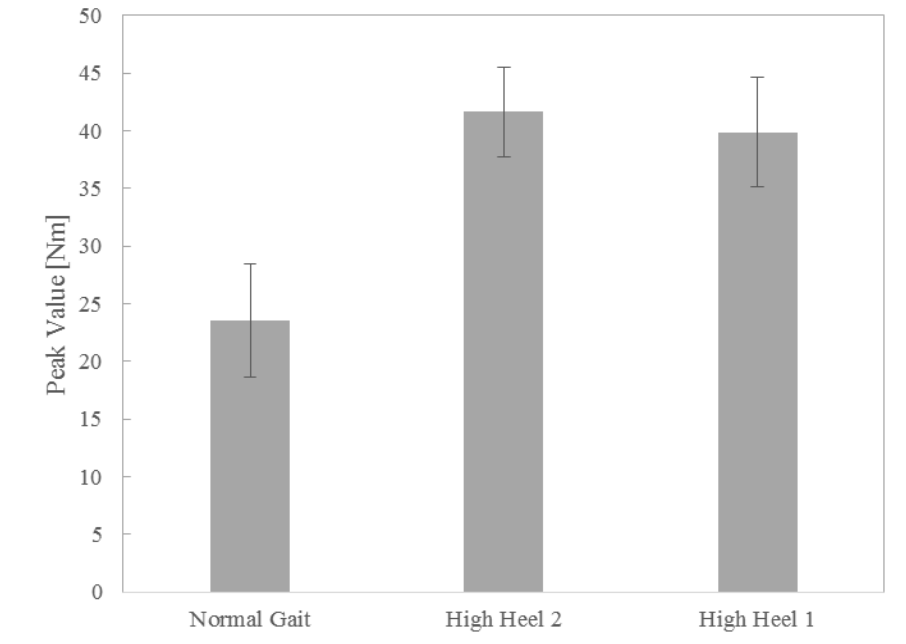
## 4.2.2 하이힐 설계와의 관계

굽의 굽기는 앞서 고찰한 것과 같이 CoP와 연관이 있다. 따라서 굽이 가늘수록 전족으로 체중이 실리게 되고 CoP가 전족으로 가기 때문에 보행에 있어 결과적으로 더 작은 무릎 모멘트를 발생 시킬 것이라고 예상 된다.

초기 접지각의 경우 무릎에서 발의 상대적인 위치에 영향을 미치기 때문에 간접적으로 CoP의 위치에 영향을 주게 된다. 예를 들어 똑같은 GRF가 발의 중간 지점에 작용 할 때, 그림18과 같은 동작과 GRF라면 발목 관절의 각도가 작을 수록 GRF와 무릎의 직선 거리가 줄어든다. 따라서 초기 접지 지점의 위치가 진행방향의 반대에 위치 할수록 무릎 관절에 생기는 모멘트가 작아지게 된다.

## 4.2.3 근골격 시뮬레이션을 이용한 무릎 모멘트 계산

하이힐 종류에 따른 무릎의 모멘트를 확인하기 위해, 근골격 시뮬레이터를 통한 역역학 해석을 진행하였고 하이힐 설계 요소에 있어 높이 외적인 요소의 차이를 관찰하고자 본 실험에서 사용된 10cm 하이힐의 결과를 비교 해 보았다. 그 결과, 하이힐1이 하이힐2보다 무릎에 큰 모멘트를 야기 했는데 이것은 10cm의 하이힐에서 초기 접지 지점의 위치가 굽의 굽기 보다 무릎에 더 큰 영향을 주었다고 볼 수 있다.



**Figure 19** 무릎 관절 모멘트의 최대값

Kerrigan<sup>[23]</sup>에 따르면 뒤꿈치의 넓이가 좁은 하이힐보다 넓은 하이힐에서의 무릎 모멘트가 크다. 이 연구에 쓰인 하이힐은 7cm 높이로, 7cm 높이의 하이힐에서는 굽의 넓이에서 오는 영향이 10cm 하이힐보다 크다고 추측 할 수 있다.

발목 관절의 변화와 CoP의 위치가 주는 영향을 좀 더 비교 분석 하기 위하여 본 실험으로 얻어진 보행 동작과, CoP 패턴, GRF 평균값을 이용하여 가상의 보행 조합을 만들고, 무릎 관절 모멘트를 계산해 보았다. 그 결과 표2와 같은 결과가 나왔고, 상기 예상과 같이 발목 관절 각도의 움직임이 작고 CoP가 발의 앞에 존재할 수록 무릎 관절 모멘트가 작아졌다. 특히 표2와 마찬가지로, CoP의 위치보다는 발목 관절에 의한 변화가 더 큼으로, 하이힐의 굽 넓이보다 초기 접지 위치에

따른 영향이 더 큰 것을 예상 할 수 있다.

**Table 2** 설계 변수에 따른 모멘트 [Nm]

		초기 접지 위치		
		뒤 (High Heel1)	중간	앞 (High Heel2)
굽 넓이	넓다 (High Heel1)	29.7	34.8	39.1
	좁다 (High Heel2)	21.8	27.0	31.1

### 4.3 하이힐 설계에의 응용

굽이 가늘어 체중을 앞으로 싣게 되어 CoP가 전족부로 이동하는 것은 기계적으로 무릎에 생기는 모멘트를 줄일 수 있으나, 이것은 하이힐의 주된 부작용인 전족에 생기는 압력이 증가함을 의미하며, 착용감을 저하시키고 무지 외반증의 악화로 이어질 수 있다<sup>[19,21]</sup>.

따라서 무릎에 영향을 미치는 영향력이 굽의 굽기보다 큰 초기 접지 지점을 더욱 적극적으로 이용할 필요가 있다. 앞서 고찰한 바에 의하면 비슷한 디자인이라도 그림20(우)와 같이 초기 접지 위치가 뒤로 향할수록 무릎에 더 인체 공학적이라는 것을 예측 가능하다.



**Figure 20** 비슷한 디자인의 초기 접지 지점이 다른 웨지 하이힐<sup>⑤⑥</sup>

또한 초기 접지 지점의 차이로 인한 발목 관절 변화는 굽이 더 낮은 하이힐의 패턴과 비슷한데<sup>[23]</sup>, 이 또한 하이힐의 보행에서 생기는 전반적인 부담을 낮춰 준다는 추측을 가능하게 한다.

## 4.4 한계 및 의의

본 연구는 피험자 수와 하이힐 종류가 제한적이었다는 한계점이 있다. 따라서 차후의 연구에서 보다 많은 피험자를 대상으로 함으로써 보다 일반화 시킬 필요성이 있으며, 보다 많은 하이힐의 종류를 이용하여 다른 설계 요소에 의한 영향도 관찰할 필요성이 있다.

그러나 이러한 한계에도 불구하고 본 연구의 의의는 분명하다. 먼저

<sup>⑤</sup> 사진 출처 “빼딱구두” [http://bbaeddak-goodoo.com/product/detail.html?product\\_no=7409](http://bbaeddak-goodoo.com/product/detail.html?product_no=7409) (2017.06.26 접속)

<sup>⑥</sup> 사진 출처 “Rowlyshoeshoe” [http://www.rowlyshoeshoe.com/product/detail.html?product\\_no=4868&cate\\_no=43&display\\_group=1](http://www.rowlyshoeshoe.com/product/detail.html?product_no=4868&cate_no=43&display_group=1) (2017.06.26 접속)

일반 보행과 하이힐 보행 사이의 CoP 패턴을 분석하였으며, 기존의 관점에서 벗어나 하이힐 간의 상관관계를 분석하였던 점에서 인체 공학 설계의 관점에서 진보적 의의가 있다.

50kg인 사람의 CoP가 2cm 이동하면 무릎 관절에 10Nm 정도의 영향을 미친다. 일반적 보행에서 무릎 관절 모멘트 최대값이 일반적으로 20~50Nm<sup>[28,31]</sup>이라는 것을 생각하면 이것은 의미가 있는 변화이다.

또한, 최근의 3d 프린터 시장의 성장과 더불어, 하이힐을 3d 프린터로 만들려는 시도가 있으며<sup>[32]</sup>, 이것은 차후 보행 패턴과 인체 형상을 고려한 개인 맞춤형 하이힐 개발 가능성을 시사한다. 하이힐 보행의 패턴의 일반적인 경향성은 존재하나<sup>[8,9,23,24]</sup>, 개개인에 따라 그 정도는 차이가 있다. 작은 보행 특성의 차이라도 앞서 고찰한 바와 같이 무릎 관절의 모멘트에 큰 영향을 미칠 수 있으므로, 개인의 보행 특성에서 미묘한 변화를 관찰 하는 것은 의의가 있다. 이러한 관점에서 본 논문에서 제시한 방법은 전반적인 하이힐 설계에 적용 할 수 있을 뿐 아니라, 개인의 보행 특성과 관절의 약점 등을 보완한 개인 맞춤형 하이힐의 개발에 적극 응용 될 수 있다.



## 제 5 장 결론

본 연구는 다음과 같은 결론을 낼 수 있다.

- 기존 하이힐 보행의 생체역학적 관찰은 일반 보행과 하이힐 보행의 비교가 주를 이루며, 하이힐의 악영향에 대하여 고찰한다.
- 하이힐의 부작용에도 불구하고 수요가 꾸준히 있기 때문에, 인간공학적 관점에서의 설계가 필요하며, 이를 위해 하이힐 보행 간의 비교 관찰이 필요하다.
- 일반 보행과 종류가 다른 하이힐에 관한 보행 실험을 진행하였으며, 압력 중심의 패턴이 일반보행과 하이힐 보행의 차이가 있었다. 또한, 보행 시 발목 관절의 패턴과 압력 중심 패턴이 하이힐의 형상 간에 차이가 있었다.
- 발목 관절 패턴의 변화는 하이힐의 설계에서 초기 접지 위치와 관계가 있다. 초기 접지 위치가 다른 것을 발목의 제어로 보간하려는 움직임이다.
- 압력 중심의 변화는 굽의 굽기와 상관이 있다. 가는 굽일수록 체중을 발 뒤꿈치에 싣기 어렵기 때문에 압력중심이 발의 전족부로 이동한다.
- 무릎에 발생하는 모멘트는 굽이 가늘고, 초기 접지위치가 전족부를 향할수록 모멘트가 줄어든다. 그러나 굽을 가늘게 만들어 체중을 전족부로 싣게 하는 것은 무릎이 아닌 부위에 부작용의 염려가 있으므로 지양해야 한다.

- 본 연구는 피험자의 수와 Case가 적다는 한계를 가진다. 차후 일반화를 위하여 더 많은 Case에서의 연구가 필요하다.
- 본 연구는 하이힐 간의 차이를 분석하고 인체 공학적 하이힐을 설계하려는 시도를 하였다는 점에서 그 의의가 있다.

## 참고 문헌

- [1] “힐 벗어던진 여성들…슬립온 · 로퍼 인기에 하이힐 판매” <연합 뉴스> 2016.05.09 06:35,  
<http://www.yonhapnews.co.kr/bulletin/2016/05/04/0200000000AKR20160504200500030.HTML> (2017.05.23 접속)
- [2] “UAB study shows that injury rates from wearing high-heeled shoes have doubled” , <https://www.uab.edu/news/innovation/item/6071-uab-study-shows-that-injury-rates-from-wearing-high-heeled-shoes-have-doubled> (2017.05.23 접속)
- [3] “키 큰 남자도 키높이 구두 찾는다” <아시아 경제> 2017.03.02 08:24,  
<http://view.asiae.co.kr/news/view.htm?idxno=2017030208140233383> (2017.05.23 접속)
- [4] 류지선. "하이힐 높이에 따른 균형성." *한국운동역학회지* 20.4 (2010): 479-486.
- [5] Cho, W. H., and H. Choi. "Center of pressure (COP) during the postural balance control of high-heeled woman." *Engineering in Medicine and Biology Society, 2005. IEEE-EMBS 2005. 27th Annual International Conference of the. IEEE*, 2006.
- [6] Hapsari, Vaniessa Dewi, and Shuping Xiong. "Effects of high heeled shoes wearing experience and heel height on human standing balance and functional mobility." *Ergonomics* 59.2 (2016): 249-264.
- [7] 平井□, et al. "ハイヒール歩行が立脚初期に膝関節屈曲角度を増大させるメカニズム." *理学療法科学* 30.2 (2015): 155-159.
- [8] Ucanok, G. M., and D. R. Peterson. "Knee and ankle deviations during

- high-heeled gait." *Bioengineering Conference, 2006. Proceedings of the IEEE 32nd Annual Northeast*. IEEE, 2006.
- [9] Esenyel, Meltem, et al. "Kinetics of high-heeled gait." *Journal of the American Podiatric Medical Association* 93.1 (2003): 27-32.
- [10] Lee, ChangRyeol. "The effects of lower extremity angle according to heel-height changes in young ladies in their 20s during gait." *Journal of physical therapy science* 26.7 (2014): 1055-1058.
- [11] Simonsen, Erik B., et al. "Walking on high heels changes muscle activity and the dynamics of human walking significantly." *Journal of applied biomechanics* 28.1 (2012): 20-28.
- [12] Park, Sumin, Minho Lee, and Jaeheung Park. "The Relationship among Stride Parameters, Joint Angles, and Trajectories of the Body Parts during High-Heeled Walking of Woman." *Journal of the Ergonomics Society of Korea* 32.3 (2013): 245-252.
- [13] 현수돈, and 김정룡. "High Heel 이 허리 근육피로에 미치는 영향에 관한연구." *대한인간공학회지* 16.3 (1997): 37-48.
- [14] Lee, Chang-Min, Eun-Hee Jeong, and Andris Freivalds. "Biomechanical effects of wearing high-heeled shoes." *International journal of industrial ergonomics* 28.6 (2001): 321-326.
- [15] do Nascimento, Nathalya Ingrid Cardoso, et al. "Barefoot and High-Heeled Gait: Changes in Muscles Activation Patterns." *Health* 6.16 (2014): 2190-2196.
- [16] Gefen, Amit, et al. "Analysis of muscular fatigue and foot stability during high-heeled gait." *Gait & posture* 15.1 (2002): 56-63.
- [17] Zöllner, Alexander M., et al. "On high heels and short muscles: A multiscale model for sarcomere loss in the gastrocnemius muscle." *Journal of theoretical biology* 365 (2015): 301-310.
- [18] 오덕원, 천승철, and 심재훈. "하이힐 뒤굽 높이가 서기 균형 및

- 발목 근육 활성화도에 미치는 영향." *대한인간공학회지* 29.5 (2010): 789-795.
- [19] Yu, Jia, et al. "Development of a finite element model of female foot for high-heeled shoe design." *Clinical Biomechanics* 23 (2008): S31-S38.
- [20] Park, Sung-woo, and Kunwoo Lee. "SIMULATION OF BIOMECHANICAL INFLUENCE OF HIGH HEELS ON MUSCULOSKELETAL SYSTEM OF FOOT AND ANKLE."
- [21] “서울대학교병원 의학정보 무지외반증 “,  
<http://terms.naver.com/entry.nhn?docId=926766&cid=51007&categoryId=51007> (2017.06.30 접속)
- [22] 장윤희, and 이완희. "하이힐 보행이 비만여성의 슬관절에 미치는 영향." *한국전문물리치료학회지* 14.3 (2007): 23-31.
- [23] Kerrigan, D. Casey, Jennifer L. Lelas, and Mark E. Karvosky. "Women's shoes and knee osteoarthritis." *The Lancet* 357.9262 (2001): 1097-1098.
- [24] Kerrigan, D. Casey, Mary K. Todd, and Patrick O. Riley. "Knee osteoarthritis and high-heeled shoes." *The Lancet* 351.9113 (1998): 1399-1401.
- [25] Barkema, Danielle D., Timothy R. Derrick, and Philip E. Martin. "Heel height affects lower extremity frontal plane joint moments during walking." *Gait & posture* 35.3 (2012): 483-488.
- [26] DeLisa, Joel A., ed. *Gait analysis in the science of rehabilitation*. Vol. 2. Diane Publishing, 2000.
- [27] “차세대 융합 기술 연구원 모션캡처 장비소개”  
<http://aict.snu.ac.kr/?p=41> (2017.06.30 접속)
- [28] Winter, David A. *Biomechanics and motor control of human movement*. John Wiley & Sons, 2009.
- [29] Ma, Yanzhao, et al. "Segment inertial parameters of Korean adults

estimated from three-dimensional body laser scan data." *International Journal of Industrial Ergonomics* 41.1 (2011): 19-29.

[30] Perry, Jacquelin, and J. M. Burnfield. "Perry 의 보행분석." *서울, 영문 출판사* 29 (2006).

[31] Vaughan, Christopher L., Brian L. Davis, and Jeremy C. O'connor. Dynamics of human gait. Vol. 2. Champaign, Illinois: Human Kinetics Publishers, 1992.

[32] 이종석, 이재정. "3D 스캐닝과 3D 프린팅을 이용한 슈즈 디자인 연구." *한국패션디자인학회지* 16.2 (2016).

## **Abstract**

# **Proposal of High Heel Design Considering Loads on Knee Joint**

Jungmi, Seo

Department of Mechanical Engineering

The Graduate School

Seoul National University

High heel shoes are the indispensable elements of modern fashion that is commonly worn by women. However, wearing high heel shoes has many drawbacks on various parts of human body, such as muscles and joints, in the biomechanical point of view. To mitigate such problems, it is necessary to analyze the effects of various design elements of high heels on human body, deviating from simply comparing and analyzing high-heel gait with normal gait. Instead of plainly recommending to abstain from frequent wearing of high heel shoes, one should develop ergonomic-oriented high heel shoes to minimize accompanying drawbacks in biomechanical perspective. Although high heel shoes are considered as one of the major issues resulting in high rate of knee osteoarthritis in women, attempts to reduce the pains on knee joints are still insufficient compared to those on feet. Thus, as an attempt to design high heel shoes based on ergonomics, this study observes gait patterns with various shapes of high heel shoes and analyzes change in the pattern according to variable design parameters other than the height of heels. Based on the study, an optimal design guide for high heels that can minimize disturbances on knee is suggested.

In conducting the study, experiments on gaits of participants wearing different types of high heel shoes were conducted by using motion capture, and the collected data were analyzed. In this process, it is observed that high-heeled gait has different gait pattern of the center of pressure from that of normal gait. Also, the gait pattern of the center of pressure and the ankle joint patterns changed in accordance with the change made in design parameters of the high heel shoes. In order to thoroughly investigate the effect of wearing high heel shoes on the knee, the knee moment is calculated and examined by conducting a simulation on musculoskeletal system. By analyzing the simulation, the optimal design variables are decided that effectively reduce the adverse effects on the knee.

**Keywords :** High Heeled Shoe Design, Ergonomics, Gait Analysis, Parameter Design, Musculoskeletal Simulation

**Student Number :** 2015-22714